

# ARTICLE DE FOND

## Les galaxies actives

Suzy Collin-Zahn, chercheur honoraire à l'Observatoire de Paris

*Françoise Combes a présenté dans l'article précédent ce que l'on pourrait appeler les « galaxies ordinaires », dont la vie, comme elle l'écrit, n'est pas « un long fleuve tranquille ». On observe aussi des galaxies encore moins tranquilles, car elles traversent une phase que l'on nomme « active ». À vrai dire, presque toutes les galaxies sont passées par cette phase au cours de leur évolution. Leur noyau devient alors brillant et variable, et émet des raies spectrales intenses et des rayons X ; il peut également produire un puissant rayonnement gamma et radio, ou projeter dans l'espace de gigantesques jets relativistes. À moins qu'il n'ait toutes ces propriétés à la fois. C'est que le trou noir central est alors copieusement nourri en matière, laquelle, avant de s'y engouffrer pour toujours, rayonne intensément ou est violemment expulsée avant d'avoir pu même s'en approcher.*

### Les trous noirs supermassifs : des objets que l'on n'attendait pas !

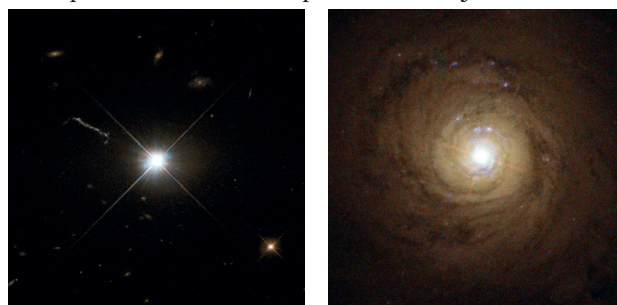
Après la Seconde Guerre mondiale, plusieurs radars sont reconvertis en radiotélescopes et tournés vers le ciel. On découvre alors avec stupéfaction qu'un rayonnement radio intense provient de plusieurs sources cosmiques. En 1952, la source radio la plus brillante est identifiée ; il s'agit d'une faible galaxie lointaine, Cygnus A (figure 3).

Par ailleurs, Carl Seyfert observe en 1943 six galaxies proches assez ordinaires, mais possédant un noyau bleu très brillant d'aspect stellaire. Il en prend les spectres et y voit des raies en émission très larges, certaines d'éléments fortement ionisés, par exemple des atomes de néon ayant perdu quatre électrons. Traduites en vitesse (effet Doppler), les largeurs des raies signifient que le gaz émissif est agité de mouvements aléatoires allant jusqu'à 8 000 km/s, un phénomène complètement nouveau à l'époque. Il faut attendre 1959 pour que Lodewijk Woltjer fasse remarquer que ces vitesses impliquent probablement, au sein du noyau, l'existence d'une masse équivalant à des centaines de millions de fois celle du Soleil.

Avec son article, Seyfert a sans le savoir découvert un nouveau domaine, celui des galaxies actives. Car les « galaxies de Seyfert » sont en tout point semblables à leurs grandes sœurs plus lointaines, les quasars, que l'on ne va pas tarder à découvrir à leur tour.

En effet, presque vingt ans plus tard, en voulant identifier optiquement l'une des sources du troisième catalogue de radiosources de Cambridge, 3C 273, Marteen Schmidt prend au mont Palomar le spectre d'une « étoile » très bleue située au centre de la source (figure 1). Ce spectre présente de très larges raies spectrales en émission, à des longueurs d'onde totalement inconnues. Schmidt comprend rapidement qu'il s'agit des raies habituelles de l'hydrogène, mais décalées vers le rouge

dans une proportion de 16 % (ce décalage est dit « redshift » en anglais), ce qui, traduit de nouveau en effet Doppler, correspond à une vitesse d'éloignement de 45 000 km/s. Comme une étoile lancée à 45 000 km/s est difficile à imaginer, Schmidt en conclut que le décalage doit être dû à l'expansion de l'Univers et donné par la loi de Hubble, selon laquelle il est proportionnel à la distance. Ce qui confère à 3C 273 une distance de un à deux milliards d'années-lumière. Puisque l'éclat varie en raison inverse du carré de la distance, on en déduit que l'objet a une luminosité de l'ordre de celle de mille galaxies ! Dans la communauté astronomique, c'est un coup de tonnerre qui vaut à Schmidt les honneurs de la première page du Times. En l'espace de quelques années, on trouve des centaines d'objets semblables, encore plus distants et aussi lumineux, et de surcroît rapidement variables avec le temps. On leur donne le nom de « quasars », contraction de « quasi stars » ou de « quasi stellar objects ».



**Fig. 1.** À gauche, le premier quasar découvert, 3C 273, avec son jet visible en haut et à gauche, et à droite une galaxie de Seyfert vue presque de face, NGC 5548. Dans les deux cas on voit que la source centrale est très petite. Images du télescope spatial Hubble. Crédit NASA.

Que sont donc les quasars, se demande-t-on alors ? Certains astronomes font immédiatement le rapprochement avec les galaxies de Seyfert, qui partagent leurs propriétés visibles<sup>1</sup> (figure 2), et pensent qu'il s'agit de

<sup>1</sup> On s'apercevra par la suite que les quasars partagent les propriétés des galaxies de Seyfert dans tous les domaines de longueurs d'onde – et pas seulement dans le domaine visible –, notamment l'émission de rayonnement X.

noyaux de galaxies particulièrement lumineux. Il faut cependant attendre presque vingt ans avant que les observations avec les grands télescopes au sol et avec le télescope spatial Hubble aient une résolution spatiale et une dynamique suffisantes pour que l'on puisse distinguer la « galaxie hôte » du quasar, tant celui-ci écrase de son éclat tout ce qui l'environne.

Tout le monde n'est pas d'accord, tant s'en faut, car ces objets sont extrêmement variables, certains pouvant gagner ou perdre une magnitude en quelques jours. Ce qui signifie – principe de causalité oblige – que leurs dimensions sont inférieures à quelques jours-lumière. Sachant que l'étoile la plus proche de nous est éloignée de quatre années-lumière, et que les quasars rayonnent comme des centaines de galaxies, c'est-à-dire comme des milliers de milliards d'étoiles comparables au Soleil, on est face à une énigme.

C'est pourquoi, pendant presque vingt ans, de nombreux astronomes – pendant les premières années ils étaient majoritaires, et parmi eux certains étaient très connus – pensent que les quasars sont proches, et que leurs redshifts ne sont pas dus à l'expansion de l'Univers mais à une loi physique encore inconnue. En effet, si les quasars sont proches, leur luminosité devient raisonnable pour leur taille. Cette « controverse du redshift », parfois très violente, s'éteint cependant à mesure que les évidences observationnelles viennent conforter l'origine cosmologique du redshift (les quasars ont les mêmes redshifts que les galaxies environnantes, par exemple).

Dans le même temps, certains astronomes plus théoriciens que les autres soutiennent de plus en plus fortement l'hypothèse de la présence au centre du noyau galactique d'un trou noir de plusieurs millions ou milliards de masses solaires. Au début des années 1980, l'hypothèse du trou noir l'emporte, car elle permet d'expliquer de nombreux phénomènes. Entre temps

d'ailleurs, on avait découvert les étoiles à neutrons, ces quasi-cadavres d'étoiles encore capables de nous envoyer de puissants signaux, qui prouvaient la validité des théories les plus hardies, puis les « trous noirs stellaires », comme Cyg X1 (à ne pas confondre avec Cyg A !).

## Le zoo des galaxies actives

Dans les années suivant la découverte des quasars, on s'aperçoit qu'il existe de nombreux objets ressemblant à des galaxies mais possédant de bien étranges propriétés. On parle alors du « zoo des galaxies actives ». On y trouve pêle-mêle, outre les quasars et les galaxies de Seyfert, des objets apparemment très différents mais présentant tous la propriété d'émettre un rayonnement intense dans un tout petit volume. Parmi les quasars, certains rayonnent en radio, d'autres non. Parmi les galaxies, il y a les « radiogalaxies » comme Cygnus A, qui sont dix mille fois plus intenses en radio qu'en optique ; les « BL Lac », ressemblant aux quasars radio mais très variables, polarisés et sans raies spectrales ; les blazars, sortes de BL Lac possédant des raies spectrales ; les « OVV », pour « objets violemment variables » ; les LINERS (pour Low Ionization Nuclear Emission Line Regions), présents dans les noyaux de nombreuses galaxies elliptiques et émettant du rayonnement X ; les galaxies ultra-lumineuses en infrarouge ou ULIRG, etc. Nous verrons plus loin comment on peut expliquer ces diverses formes d'activité.

Dans un premier temps, on nommait « galaxies actives » toutes les galaxies présentant des raies spectrales en émission. On confondait donc les galaxies à grande formation d'étoiles – présentant des raies en émission provenant du gaz chauffé par les étoiles – et les galaxies possédant un noyau activé par un trou noir. On a maintenant pris l'habitude de n'appeler que les secondes « galaxies actives », ou, mieux, « galaxies à noyau actif » ou AGN en anglais (mot que nous utiliserons par la suite pour simplifier), le terme englobant les quasars très lumineux et les galaxies plus proches au noyau parfois peu lumineux dans le visible, mais émettant par exemple des rayons X ou possédant une source radio compacte. Ainsi les ULIRG sont en général des galaxies à formation d'étoiles et non des AGN.

## Comment fonctionne le trou noir au centre des galaxies ?

D'abord pourquoi est-il si « lumineux » ? Il ne l'est évidemment pas par lui-même, mais par son environnement. Comme tout objet massif, il attire la matière proche ; celle-ci se conduit comme une météorite venant de l'espace qui s'enflamme et devient une belle étoile filante en pénétrant dans l'atmosphère terrestre. Or, près du trou noir, la vitesse de la « météorite » dépasse cent mille km/s au lieu d'être de quelques dizaines de km/s. Elle possède donc une énorme énergie de mouvement qui est convertie en chaleur et rayonnée, avant que ce

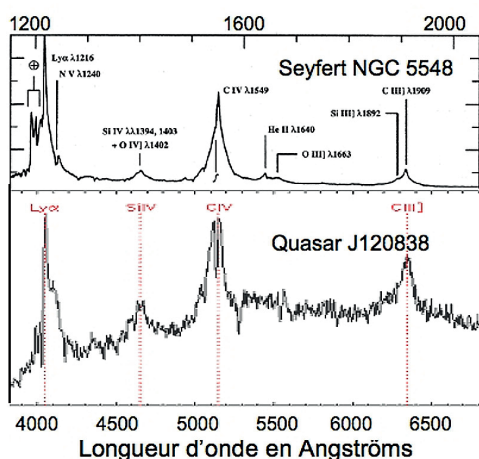


Fig. 2. Spectres ultraviolet de la galaxie de Seyfert NGC 5548 et du quasar J120838 obtenus avec le télescope spatial Hubble. On constate qu'ils montrent des raies spectrales identiques, mais celles du quasar sont déportées dans l'optique à cause du redshift. Crédit NASA.

qui en reste ne disparaisse dans le trou noir. L'énergie rayonnée peut s'élever à 30 % de l'énergie au repos – le fameux  $E = m_0c^2$  de la formule d'Einstein – un rendement bien plus grand que les réactions nucléaires dans les étoiles (0,7 %)<sup>2</sup>.

Cette matière provient des confins de la galaxie hôte, et pour parvenir au centre, il lui faut se débarrasser de l'énorme moment cinétique qu'elle possède au départ<sup>3</sup>. Comme l'explique F. Combes, les barres effectuent une partie du travail, ainsi que les perturbations se produisant lors de la collision et de la fusion de deux galaxies. À une dizaine d'années-lumière, soit dix mille à cent mille fois le rayon du trou noir, on pénètre dans la zone où domine sa gravitation ; c'est seulement là que l'ogre tapi au centre va jouer son rôle en attirant la matière, laquelle peut toutefois encore lui échapper si elle a une vitesse assez élevée<sup>4</sup>. Un autre processus va alors prendre le relais : le « disque d'accrétion ». En effet, le gaz ne se précipite pas radialement sur le trou noir, car sa vitesse initiale a une probabilité très faible d'être dirigée précisément vers lui. Elle spirale en s'en rapprochant très lentement, formant un disque dont la vitesse de rotation augmente suivant la loi de Kepler jusqu'à approcher celle de la lumière. Au début, le gaz forme un tore épais rempli de poussières, puis devient un disque mince qui se réchauffe à cause de la viscosité<sup>5</sup> et rayonne de plus en plus intensément. Sa couleur change : de rouge à l'extérieur, il devient bleu puis ultraviolet près du trou noir, ce qui explique que la plupart des AGN soient très bleus (à l'émission) et rayonnent essentiellement dans le domaine ultraviolet. Cependant, tous les AGN n'ont pas de disque d'accrétion, ou bien il peut être en partie épuisé et ne pas s'étendre suffisamment loin, c'est pourquoi certains, comme les LINERS, sont invisibles en optique.

## Comment les AGN se manifestent-ils ?

Les larges raies en émission sont observées seulement dans les spectres des quasars et des galaxies de Seyfert. On pense qu'elles proviennent de nuages s'échappant à grande vitesse du disque d'accrétion ; mais il faut

2 En supposant un rendement  $\epsilon$  de 10 %, et une luminosité  $L$  de 1039 W (celle de 3C 373), soit  $L = c^2 \epsilon \frac{dM}{dt}$ , il faut que le trou noir avale  $\frac{dM}{dt} = 1,7$  étoile comme le Soleil par an, ce qui n'est pas aussi exorbitant qu'on pourrait le penser.

3 Le moment cinétique est en effet égal à  $R \times V \times M$ , où  $R$  est le rayon,  $V$  la vitesse de rotation et  $M$  la masse ; si la matière se trouve au départ à 3 000 parsecs ( $\approx 10^{20}$  m) du centre et a une vitesse de rotation de 200 km/s, qu'elle parvient avec une vitesse de rotation de 200 000 km/s jusqu'à l'horizon d'un trou noir ayant une taille d'un milliard de mètres (voir l'encart), un facteur  $10^8$  sépare la valeur du moment cinétique au départ et à l'arrivée !

4 Précisément, au dessus de la vitesse de libération.

5 Le mécanisme invoqué pour cette viscosité est l'« instabilité magnéto-rotationnelle », qui provient du cisaillement du champ magnétique dans le disque en rotation différentielle (c'est le cas d'un disque képlérien) contenant des particules chargées.

avouer que leur origine est mal comprise, bien qu'elles jouent un rôle fondamental dans la détection des quasars. Certaines Seyfert (de type 1) ont à la fois des raies larges et d'autres plus étroites provenant de régions plus éloignées du trou noir, et ayant par conséquent des vitesses plus faibles. D'autres (les Seyfert de type 2) ne présentent que les raies plus étroites ; nous allons en voir la raison un peu plus loin.

Presque tous les AGN, même les plus faibles, émettent du **rayonnement X** ; ce dernier est variable sur des échelles de temps très courtes, parfois de l'ordre de l'heure. Il provient d'une couronne très chaude entourant le trou noir dont il représente véritablement **la signature**. Notons d'ailleurs que les AGN rendent compte d'au moins 80 % de tout le rayonnement X du ciel. Dans certains objets, on observe au voisinage de 7 keV une raie du fer produite par la réflexion du rayonnement de la couronne sur le disque d'accrétion. Elle est déformée<sup>6</sup> par des effets de relativité générale d'autant plus importants qu'on en est plus proche. Comme la matière plonge plus près du trou noir s'il est en rotation, la forme de la raie permet – vaguement, avouons-le – de distinguer les trous noirs en rotation des trous noirs sans rotation (voir l'encart).

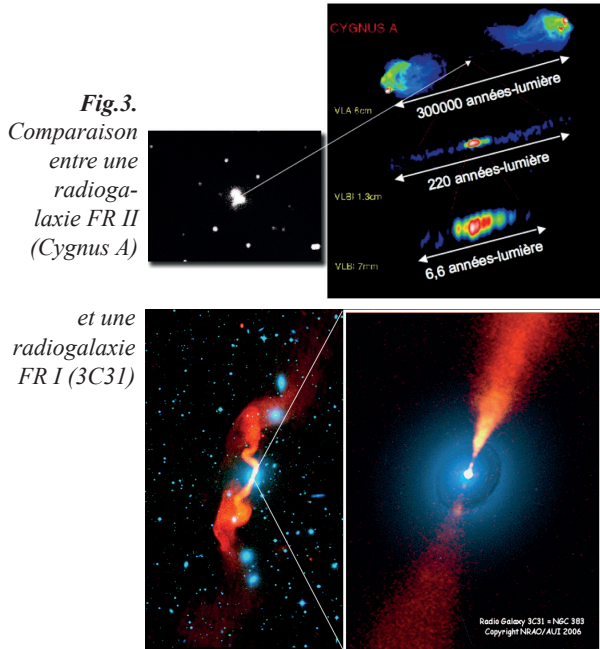
Une composante importante de l'émission des AGN est le rayonnement radio. Il peut être confiné dans la région centrale, ou bien s'étendre sous forme d'un jet se propageant parfois jusqu'à des millions d'années-lumière. Les jets sont constitués de particules chargées ayant des vitesses très proches de celle de la lumière (particules « relativistes »). Ils émettent du rayonnement « synchrotron »<sup>7</sup> qui se prolonge parfois jusque dans le domaine visible. Dans certaines radiogalaxies et quasars radio, l'émission se prolonge jusqu'au domaine gamma. Elle est alors due à un processus appelé « Compton inverse », où les électrons relativistes communiquent leur énergie aux photons radio ou optiques et ainsi les propulsent dans le domaine gamma.

Les « radiogalaxies » ont été divisées en deux classes par Fanaroff et Riley : les FRI et les FR II. Les FRI ont des jets étendus plus brillants au centre ; les FR II, plus puissantes, se terminent par de grands lobes possédant à leurs extrémités des « taches chaudes » dues à des chocs sur le gaz intergalactique (figure 3). Le scénario préféré pour la formation des jets est l'effet Blandford-Znajek : si le trou noir est en rotation rapide, son frottement sur le disque d'accrétion provoque l'apparition de champs électrique et magnétique qui extraient l'énergie de rotation du trou noir par effet dynamo. On s'attend donc à ce que des jets soient présents lorsque le trou noir possède une rotation rapide. Nous allons voir que c'est le cas.

6 Elle est étirée vers le rouge et amplifiée du côté bleu.

7 Du nom des accélérateurs – les synchrotrons – dans lequel ce rayonnement a été identifié pour la première fois, en 1950. Il est émis par des particules relativistes chargées se déplaçant dans un champ magnétique.

Un autre mécanisme d'éjection est celui des vents (« outflows » en anglais), un phénomène ressemblant aux jets mais dans lequel du gaz non relativiste est dispersé dans un grand angle. La plupart du temps, on le détecte indirectement par de larges raies spectrales en absorption. On pense que ces vents s'échappent de la surface du disque d'accrétion en suivant les lignes de force du champ magnétique.



**Fig.3.** Comparaison entre une radiogalaxie FR II (Cygnus A) et une radiogalaxie FR I (3C31). En haut, la galaxie Cygnus A, à gauche dans le visible et à droite le jet radio associé, à différentes échelles : on voit qu'il provient d'une région très petite à l'intérieur du noyau. En bas, un montage optique (en bleu) et radio (en rouge) de 3C31. Les sources radio sont en fausses couleurs.

## Le trou noir mène le bal

On a rapidement compris que les AGN possèdent tous un trou noir massif et que leurs apparences différentes sont dues soit à des angles de vue différents, soit à des masses, des taux d'accrétion ou des vitesses de rotation différents, soit encore, naturellement, à un état différent d'évolution.

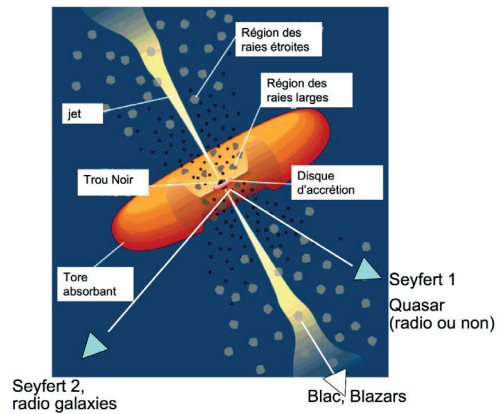
### Influence de l'inclinaison : le « schéma unifié »

Le principe est simple : comme le trou noir possède un plan privilégié correspondant au tore épais et au disque d'accrétion, les phénomènes qui se produisent au centre sont cachés ou au contraire visibles suivant l'orientation de la ligne de visée (figure 4).

### Influence de la rotation

Une question a tarabudé longtemps les astronomes : pourquoi les jets sont-ils toujours observés dans des galaxies elliptiques massives ?

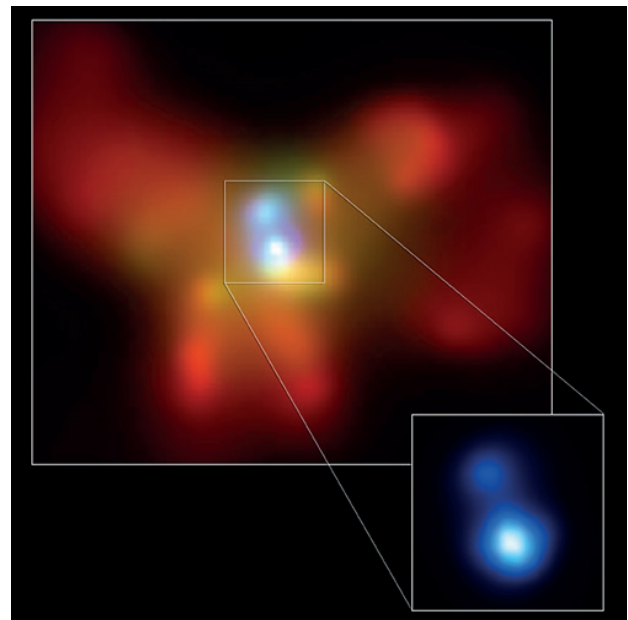
On sait que celles-ci sont formées par l'agglomération de plus petites galaxies. Chacune possède son trou



**Fig. 4.** En 1995, Ury et Padovani ont proposé ce « schéma unifié » tenant compte de la direction dans laquelle est observé un AGN. Les Seyfert de type 1, qui ont des raies très larges, sont vues de face, et les Seyfert 2 sont vues par la tranche, le tore cachant alors la région plus centrale. Les blazars et les BL Lac sont respectivement des quasars radio et des galaxies FR I dont le jet pointe dans une direction proche de la ligne de visée ; ils sont vus de face. Le rayonnement est alors amplifié par un effet relativiste (cette amplification explique pourquoi on ne voit dans certains cas que la partie du jet dirigée vers nous, comme dans 3C 273, alors qu'ils sont certainement éjectés symétriquement).

noir supermassif ; lors d'une fusion, les trous noirs se rapprochent et finissent par tourner l'un autour de l'autre. Parfois l'un est éjecté de la galaxie par un effet de fronde. On en a des preuves par l'observation, loin du centre d'une galaxie et de leur frère supermassif resté au centre, de trous noirs « errants », ainsi que d'AGN binaires (figure 5).

La plupart du temps, les deux trous noirs doivent finir par fusionner, formant un trou noir plus massif animé



**Fig. 5.** Image en rayons X de la galaxie NGC 6240, constituée de deux galaxies en train de fusionner, prise avec le télescope spatial Chandra, superposée à une image optique. Deux noyaux contenant chacun un trou noir sont visibles en rayons X. Crédit NASA.

d'une rotation rapide<sup>8</sup>. Or on a vu que la présence d'un jet implique une rotation rapide du trou noir. Il est donc normal de trouver les jets dans les galaxies elliptiques massives.

### Influence du rapport entre la luminosité et la masse

La luminosité est limitée supérieurement par la « luminosité d'Eddington<sup>9</sup> », atteinte lorsque la pression du rayonnement émis contrebalance la gravité et bloque l'accrétion. Les quasars, recevant autant ou plus de matière qu'ils ne peuvent en avaler, rayonnent près de cette limite – ce qui permet de déterminer approximativement la masse du trou noir. Les propriétés des AGN dépendent fortement du rapport entre la luminosité observée (incluant tous les domaines de longueur d'onde) et la luminosité d'Eddington et, comme cette dernière est proportionnelle à la masse, du rapport entre la luminosité et la masse. Ainsi les rapports d'intensités entre les raies spectrales dépendent-ils fortement du rapport L/M, sans que l'on en comprenne encore la raison. En revanche, on s'explique bien pourquoi les AGN ayant un faible rapport L/M ont un rayonnement X intense<sup>10</sup>.

### Les grands relevés et l'évolution des AGN

Deux grandes révolutions se sont produites au cours de ces deux dernières décennies. L'une correspond aux gigantesques simulations numériques, telle celle qui a conduit à la figure 2 de l'article de F. Combes. L'autre est celle des Big Data, dont l'astronomie est l'une des plus grandes pourvoyeuses. Ces données proviennent des très grands relevés obtenus grâce aux progrès des détecteurs et à l'existence de télescopes dédiés, comme le télescope Sloan aux États-Unis : le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) contient ainsi des centaines de milliers de quasars et de galaxies actives confirmés, et plus d'un million de candidats. De grands relevés de données X et radio sont également effectués ; la comparaison entre les différentes longueurs d'onde permet de découvrir des candidats nouveaux et des propriétés nouvelles. Par ailleurs, les grands télescopes munis d'une optique sophistiquée détectent des AGN de plus en plus lointains. Ces deux types d'observations se conjuguent pour prouver que les AGN et les galaxies normales ont suivi une évolution parallèle depuis leur naissance, quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Ce qui pose des problèmes pour les trous noirs supermassifs, dont certains ont déjà atteint à

ce moment-là des masses considérables : comment ont-ils grossi aussi rapidement ? Comment sont-ils nés ? Ils pourraient s'être effondrés directement en trous noirs d'environ un million de masses solaires, en même temps que se formaient les protogalaxies, ou bien provenir de l'agglomération de trous noirs stellaires formés lors de l'effondrement des premières étoiles. Les modèles ne sont pas encore suffisamment élaborés pour permettre de choisir entre ces deux solutions.

### La fausse retraite des trous noirs

Un quasar cesse de rayonner après une centaine de millions d'années lorsqu'il a avalé toute la matière issue, entre autres, des fusions de galaxies et contenue dans sa sphère d'influence. Que se passe-t-il alors ? Il devient « dormant » et perceptible seulement par la gravité qu'il exerce autour de lui. Grâce à cette propriété, on a découvert que toutes les galaxies « normales » assez massives contiennent, camouflé au centre, un trou noir dont la masse est quelques millièmes de celle du bulbe de la galaxie hôte (figure 6). C'est une preuve de leur évolution concomitante, due en partie à l'effet évoqué par F. Combes : le rayonnement, le jet et les vents pourraient expulser une grande partie du gaz de leur galaxie et arrêter leur croissance. La question est loin d'être réglée...

Il existe en particulier de notables exceptions à cette relation. On vient ainsi de découvrir que certaines galaxies naines « ultra-compactes » possèdent des trous noirs presque aussi massifs que la galaxie elle-même ! Il s'agit probablement de galaxies dont les étoiles et le gaz ont été littéralement balayés et capturés lors de leur traversée d'une galaxie plus massive.

Rappelons en terminant que les trous noirs dormants peuvent se réveiller, et même très facilement ; il suffit que les effleure un nuage de gaz ou tout simplement une étoile. Si c'est une étoile, elle est alors déchirée par les violents effets de marées qu'elle subit près du trou noir ; une partie s'échappe, mais l'autre est capturée ; le phénomène se manifeste par une émission brutale de rayons X, observée dans un certain nombre d'AGN. Le trou noir central de la Voie lactée, Sgr A\*, a ainsi eu des

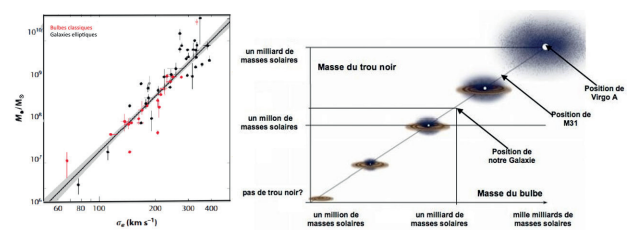


Fig. 6. À gauche, la relation observée entre la masse du trou noir et la dispersion de vitesse dans le bulbe, d'après Kormendy et Ho, 2013. Cette dernière peut être traduite en masse du bulbe. À droite, un schéma simplifié de la relation entre la masse du trou noir et celle du bulbe.

8 C'est l'équivalent des trous noirs binaires de quelques dizaines de masses solaires dont on a observé récemment la fusion accompagnée de l'émission d'ondes gravitationnelles.

9 Eddington est un célèbre astronome anglais du début du xxe siècle, qui a été entre autres l'auteur de la première vérification de la relativité générale, en 1919, lors d'une éclipse totale de Soleil.

10 Ils ont une couronne chaude et pas de disque d'accrétion.

« poussées de fièvre » au cours des derniers millions d'années, et il en subira d'autres qui iront probablement jusqu'à transformer parfois la Voie lactée en galaxie de Seyfert, heureusement sans que rien ne soit perturbé sur notre Terre hospitalière. D'ailleurs, comme toutes les galaxies possédant un trou noir supermassif, à un moment dans le passé la Voie lactée a dû être un quasar, modeste il est vrai puisque son trou noir est resté peu massif.

### **Note pour y voir clair dans les trous noirs**

Toutes les galaxies « ordinaires » possédant un trou noir supermassif central traversent des phases actives à différentes époques de leur vie, y compris présentement. Elles se produisent lorsque le trou noir a de la matière à avaler. Lorsqu'il en a beaucoup, la galaxie devient un quasar ; lorsqu'il en a un peu moins, une galaxie de Seyfert, et encore moins, un LINER.

Parallèlement, si le trou noir est en rotation par suite d'une fusion avec un autre trou noir, la galaxie devient un quasar radio ou une simple radiogalaxie. Enfin, l'angle sous lequel nous le voyons correspond à des sous-classes de galaxies, comme la distinction entre Seyfert de type 1 et 2, ou bien entre les radiogalaxies et les BL Lac, ou entre les quasars et les blazars.



#### **Caractéristiques d'un trou noir**

Un trou noir est un objet si compact que l'intensité de son champ gravitationnel empêche de s'en échapper la matière et le rayonnement qui ont pénétré en deçà de son « horizon ». Le rayon de l'horizon, appelé aussi rayon gravitationnel ou de Schwarzschild (du nom du physicien allemand qui a le premier étudié les trous noirs, en 1916) est égal à  $2GM/c^2$ , où  $G$  est la constante de la gravitation,  $M$  la masse du trou noir, et  $c$  la vitesse de la lumière, soit 3 kilomètres pour un trou noir d'une masse solaire et 3 milliards de kilomètres – 20 ua – pour un trou noir d'un milliard de masses solaires comme ceux qui sont considérés ici (si la Terre pouvait devenir un trou noir, sa taille serait celle d'une bille). On constate que ce rayon est proportionnel à la masse, ce qui signifie que la densité moyenne d'un trou noir est d'autant plus petite que sa masse est grande, contrairement à ce qu'on pourrait imaginer.

Outre sa masse, un trou noir est caractérisé par sa rotation et sa charge électrique. Cette dernière est toujours supposée nulle car la matière cosmique qu'avale le trou noir est électriquement neutre. En ce qui concerne la rotation, on distingue les trous noirs sans rotation ou trous noirs de Schwarzschild, et ceux avec rotation ou trous noirs de Kerr (un physicien néo-zélandais). Un paramètre fondamental est l'ISCO (« Innermost Stable Circular Orbit ») ou dernière orbite circulaire stable en dessous de laquelle la matière tombe sans rayonner dans le trou noir. Pour un trou noir sans rotation, le rayon de l'ISCO vaut trois fois le rayon de Schwarzschild ; il est cinq fois plus petit pour un trou noir de Kerr extrême. L'énergie rayonnée étant voisine de  $GM/R$ , on en déduit que celle rayonnée autour d'un trou noir de Kerr est environ cinq fois plus grande que celle produite autour d'un trou noir de Schwarzschild.